

기후변화 시나리오에 따른 용수구역 기반 소구역의 가뭄전망 및 갈수빈도해석 : 김천시 지역을 중심으로

김지은·이배성*·유지영**·권현한***·김태웅[†]

한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과

*㈜삼안 수자원부

**한양대학교(ERICA) 공학기술연구소

***세종대학교 건설환경공학과

Low-Flow Frequency Analysis and Drought Outlook in Water Districts Under Climate Change Scenarios : A Case Study of Gimcheon-si, Korea

Jieun Kim·Baesung Lee*·Jiyoung Yoo**·Hyun-Han Kwon***·Tae-Woong Kim[†]

Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Korea

**Water Resources Development Department, Saman Corporation, Korea*

***Research Institute of Engineering and Technology, Hanyang University(ERICA), Korea*

****Department of Civil Engineering, Sejong University, Korea*

(Received : 20 October 2020, Revised : 6 January 2021, Accepted : 23 January 2021)

요약

최근 기후변화에 기인한 기상변동성 증가에 따라 지역에 적합한 가뭄 감시 및 전망에 대한 필요성이 높아지고 있다. 특히, 경상북도 김천시의 경우 기후변화로 인해 가뭄 발생빈도 및 심도가 증가하고 있어 상습적인 가뭄피해를 겪고 있다. 이러한 이유로 용수구역 기반의 소구역에 대해 가뭄 특성을 분석하고 기후변화를 고려한 기준갈수량 산정이 필요하다. 본 연구에서는 김천시의 급수체계 및 지역 특성이 반영된 8개 지구에 대해 다양한 기후변화 시나리오에 따른 기상학적 가뭄 및 수문학적 가뭄 전망을 수행하였다. 또한, 유출량 및 갈수량을 활용하여 가까운 미래에 대한 갈수빈도해석을 수행하였다. 그 결과, 기상학적 가뭄은 S0(1974~2019) 기간에서 가뭄발생빈도, 지속기간 및 심도가 크게 나타났으며, 수문학적 가뭄은 RCP 4.5의 경우 대부분 S2(2041~2070) 기간에서, RCP 8.5의 경우 S3(2071~2099) 기간에서 위험한 것으로 나타났다. 또한 갈수빈도해석을 통해 미래 유출량은 증가하지만 가뭄의 강도 및 빈도가 더욱 증가한다는 것을 확인하였다. 본 연구방법 및 결과는 지방자치단체 가뭄 대책 및 수자원 시설물에 관한 기준 등에 활용될 수 있다.

핵심용어 : 기후변화, 가뭄전망, 갈수빈도해석, 용수구역

Abstract

Increase of climate variability due to climate change has paved the way for regional drought monitoring and outlook. In particular, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, is suffering from frequent and periodic drought damage as the frequency and magnitude of drought are increasing due to climate change. For this reason, it is necessary to analyze drought characteristics for sub-districts based on water district and calculate the basic low-flow considering climate change. In this study, meteorological and hydrological drought outlook were carried out for 8 sub-districts considering the water supply system and regional characteristics of Gimcheon-si according to various climate change scenarios. In addition, the low-flow frequency analysis for the near future was also performed using the total amount of

[†]To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University(ERICA), Korea
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr

- Jieun Kim Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea/Graduate Student(helloje2@hanyang.ac.kr)
- Baesung Lee Water Resources Development Department, Saman Corporation, Gwacheon 13837, Korea/Chief Engineer(bslee1@samaneng.com)
- Jiyoung Yoo Research Institute of Engineering and Technology, Hanyang University(ERICA), Ansan 15588, Korea/Research Professor(jjyoo84@gmail.com)
- Hyun-Han Kwon Department of Civil Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea/Professor(hkwon@sejong.ac.kr)
- Tae-Woong Kim Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University(ERICA), Ansan 15588, Korea/Professor(twkim72@hanyang.ac.kr)

runoff and the low-flow. The overall results indicated that, meteorological droughts were found to be dangerous in the S0(1974~2019) period and hydrological droughts would be dangerous in the S2(2041~2070) period for RCP 4.5 and in S3(2071~2099) period for RCP 8.5. The results of low-flow frequency analysis indicated that future runoff would increase but drought magnitude and frequency would increase further. The results and methodology may be useful for preparing local governments' drought measures and design standards for local water resources facilities.

Key words : Climate Change, Drought Outlook, Low-Flow Frequency Analysis, Water district

1. 서 론

최근 지구온난화 현상에 의해 기온증가와 더불어 극한현상이 빈번히 발생하고, 이로인해 강우 패턴이 변화하면서 자연재해의 발생빈도 및 규모가 증가하고 있다. 특히 가뭄의 경우 다른 자연재해와 달리 점진적으로 광범위한 지역에서 발생하기 때문에 적절한 대응을 하지 못하면 그 피해가 심각해진다. 더욱이 기후변화 등으로 인해 장기간 가뭄이 누적될 경우 수자원 공급에 영향을 미쳐 사회·경제적으로도 큰 피해를 야기시킨다. 하지만, 가뭄의 발생특성을 이해하여 적시에 가뭄을 감지하고 예측한다면 그 피해를 최소화 할 수 있기 때문에, 가뭄에 대한 정확한 모니터링 및 전망은 매우 중요하다(Yoon et al., 2014; Kwon et al., 2015).

일반적으로, 가뭄을 정량적으로 모니터링하기 위해 다양한 가뭄지수가 활용되고 있다. Lee et al.(2015)는 소양강댐 유역에 대해 기상학적 가뭄지수인 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)와 표준강수증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)를 활용하여 기상학적 가뭄을 평가하였고, 하천수가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)를 활용하여 수문학적 가뭄을 평가하였다. 두 가뭄지수를 비교한 결과 기상학적 가뭄지수와 월 유입량 및 SDI는 높은 상관성을 보였다. Tirivarombo et al.(2018)은 수자원 확보가 매우 중요한 잠비아 북부 Kafue 유역에 대해 SPI와 SPEI를 활용하여 가뭄을 모니터링 하였으며, 각각 가뭄 발생특성을 확인한 결과 SPEI는 보통 및 심한 가뭄을, SPI는 극한 가뭄을 잘 감지하였다.

하지만, 가뭄재해에 선제적으로 대응하기 위해서는 단순히 현재의 가뭄을 분석하는 것에 그치지 않고 기후변화 시나리오 등을 활용하여 미래 가뭄을 중·장기적으로 전망하는 것이 필요하다. 또한, 미래 예측 및 전망 수행시 발생할 수 있는 불확실성을 줄이기 위하여 다양한 시나리오를 활용해야 한다. 미국 Arkansas Red 강 유역의 가뭄 모니터링과 함께 미래 가뭄을 전망하기 위하여 Liu et al.(2013)은 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 4.5 및 8.5의 두가지 온실가스 배출 시나리오에 따른 16개 지구기후모델(Global Climate Models, GCMs)을 활용하여 SPI와 파머가뭄심도지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 산정하고 비교·분석하였다. 우리나라에서는 Park et al.(2013)이 미래 가뭄의 확률론적 전망을 위해서 A2 시나리오에서 4개의 GCMs, RCP 8.5 시나리오에서 1

개의 GCM을 활용하여 SPI를 산정하고 가뭄빈도해석을 수행하였다. Gwak et al.(2018)는 APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)의 Integrated Modeling Solution (AIMS)에서 제공하는 29개 GCM 모델을 통해 유효가뭄지수(Effective Drought Index)를 산정하여 기후특성을 고려한 가뭄특성변화를 살펴보았다. 우리나라 가뭄을 전망한 결과, 총 강수량이 증가함에 따라 가뭄의 발생횟수, 지속기간은 감소하지만 가뭄의 강도는 증가하였다. 특히 낙동강 및 섬진강 유역은 가뭄이 심화될 것으로 판단하였다. 이와 같이 미래 가뭄에 대한 전망결과는 큰 불확실성을 가지고 있으며, 선정된 기후 모델에 따라 결과가 상이하다. 따라서, 특정한 하나의 모형이나 시나리오를 기반으로 가뭄을 전망하기보다는, 최대한 많은 기후변화 시나리오를 통해 가뭄을 전망하여 불확실성을 정량화할 필요가 있다.

한편, 가뭄은 단순히 물리적 또는 자연적 현상뿐만 아니라 수자원 공급 및 용수 수요간의 상호작용으로 인해 사회에 커다란 영향을 미친다. 특히, 우리나라는 계절별 강수량 및 유량의 변동이 매우 크기 때문에 안정적인 용수공급에 어려움이 있다. 따라서 안정적인 용수공급을 위한 효과적인 물관리를 하기 위해서는 다목적 댐 및 저수지와 하천에 대해 갈수빈도해석을 적용할 필요가 있다. Caruso (2000)는 뉴질랜드 Otago 지역의 21개 하천에 대해 다양한 갈수빈도 해석 기법을 적용하여 하천흐름이 제 기능을 할 수 있는 최소 유량을 설정하는데 필요한 기준갈수량을 제시하였다. Yoon et al.(2014)는 기후변화에 대응하기 위한 방안을 제시하기 위해 강원도 광동댐 유역을 대상으로 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오 중 HadGEM2-AO에 Arc-SWAT 모형을 적용하여 평균유출량 및 저유량 시계열 자료를 구축하고 경제핵심수를 이용하여 비매개변수적 갈수빈도해석을 수행하였다. Ahn and Plamer (2016)은 미국 Connecticut 강 유역에서 저유량 자료의 발생빈도 및 심도에 대한 주변 확률분포 및 코플라 함수를 적용하여 비정상성 이변량 갈수빈도해석을 수행하였다. 국내·외에서 댐 및 하천 갈수량 및 평균 유출량 등의 자료를 활용하여 갈수빈도해석을 수행하여 기준갈수량을 설정하고 있으며, 김천시도 저수지 및 하천 관리를 위해 이러한 기준갈수량을 적용하고 있다. 하지만, 점차 유황이 변화됨에 따라 기준갈수량도 기후변화의 영향을 고려하여 지역별로 재산정될 필요가 있다.

이처럼 가뭄 모니터링 및 전망 그리고 갈수빈도해석은 지점 기반 또는 유역단위로 분석되고 있지만, 농어촌 지역에서는 용수구역으로 나누어 가뭄에 대응하기 때문에 지점

또는 유역단위의 가뭄정보만으로는 한계가 있다. 김천시 가뭄대책종합마스터플랜에서도 용수구역 또는 급수체계에 따른 가뭄대책을 제시하고 있으므로, 원활한 가뭄대책을 마련하기 위해서 물 이동특성을 고려하여 지역에 적합한 가뭄 모니터링 및 전망 그리고 갈수빈도해석을 수행해야 한다. Kwon et al.(2007)은 PDSI, 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI) 및 수정지표수공급지수(Modified SWSI)를 활용하여 경기도의 안고 및 안서 용수구역을 대상으로 기상학적·농업적·수문학적 가뭄을 평가하였으며, Kim et al.(2009)는 금강유역 내 수문학적 정보들을 공간내삽법 및 면적가중법을 적용하여 용수구역으로 세분화하고, 농업적 지표수공급지수(Agricultural SWSI)를 산정하여 농업가뭄을 평가하였다. 이와 같이 현지의 수리시설물 및 용수공급체계가 고려된 용수구역 단위의 가뭄 전망 및 빈도해석을 수행하여, 가뭄에 대한 기초자료를 토대로 지역 맞춤형 가뭄대책이 이루어질 수 있어야 한다. 왜냐하면, 용수구역 단위의 가뭄 분석 결과를 활용한다면 물부족이 발생할 것으로 판단되는 지구에 신속하고 체계적인 용수공급을 위한 수자원 운영이 가능하기 때문이다.

지점 또는 유역으로 구축된 자료를 용수구역 단위로 변경하기 위하여 일반적으로 티센계수와 같은 면적비가 많이 이용된다. Ahn et al.(2008)은 행정구역 단위의 현저수량 자료를 면적 가중 평균을 이용하여 용수구역단위로 재구축하였으며, Im et al.(2005)는 티센 가중법을 적용하여 한강 및 낙동강 유역에 대해 평균 월강수량을 산출하였다. 또한, Bae et al.(2007)은 단순 면적비 유량배분 기법 및 수문학적 특성을 이용한 유량배분 기법을 통해 유량배분의 정확도를 분석하였다.

하지만, 현재 김천시의 용수구역 기반 소구역에 대한 가뭄 전망 및 미래 갈수빈도해석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 중권역 단위의 기후변화시나리오에 김천시 8개 지구의 면적비를 적용하여 용수구역 단위의 기후변화시나리오로 변환하였다. 이렇게 변환된 시나

리오를 바탕으로 기상학적 및 수문학적 가뭄을 전망하고, 미래 하천 유량에 대한 갈수빈도해석을 수행하여 기후변화 영향이 고려된 기준갈수량을 제시하였다.

2. 연구자료 및 지역

2.1 연구지역

본 연구는 경상북도 서북부에 위치한 김천시를 대상으로 수행되었다. 김천시는 용수수요 변화, 하천수 및 저수지 등 수원부족 및 수리시설물의 내한능력 부족으로 인해서 상습적인 가뭄피해를 겪고 있다. 이러한 가뭄피해에 대비하고 용수구역 및 급수체계 등 물 이동특성 및 지역여건을 종합적으로 고려하여, Fig. 1과 같이 김천시를 용수구역을 기반으로 하는 8개 지구로 구분하였다. 따라서, 본 연구에서는 김천시 가뭄대책 마련을 위해 8개 지구에 대한 미래 가뭄 전망 및 갈수빈도해석을 통하여 가뭄피해예상지역의 가뭄 특성을 검토하였다. 또한, 김천시 소구역에 대한 용수 수요 및 공급 관리를 위해 기후변화 영향이 고려된 기준갈수량을 제시하였다.

2.2 연구자료

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가 보고서에서는 기후변화에 대한 영향을 분석하기 위하여, 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였으며, 이를 대표농도경로(RCP)라고 정의하였다. RCP 시나리오는 온실가스 등에 의해 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 복사강제력에 따라 RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 등 총 4가지로 구분된다. RCP 2.6은 인간 활동에 의해 발생된 영향을 지구 스스로 회복 가능한 경우, RCP 4.5는 온실가스 저감정책이 상당히 실현된 경우, RCP 6.0은 온실가스 저감정책이 어느정도 실현된 경우, RCP 8.5는 온실가스 저감정책

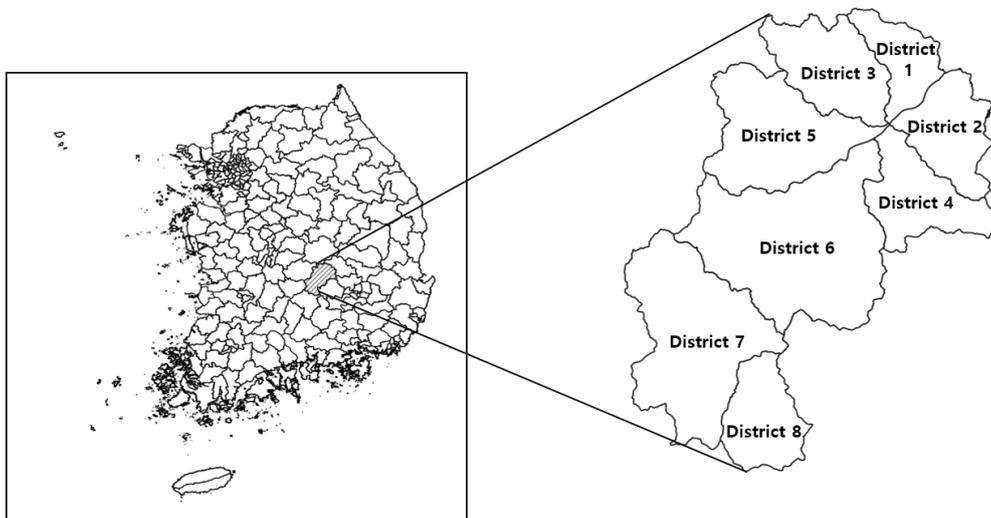


Fig. 1. Study area

없이 현재 추세로 배출될 경우를 나타낸다. 본 연구에서는 RCP 4.5 및 RCP 8.5를 적용하여 온실가스 저감정책의 유무에 따른 기후변화 전망을 고려하였다. 지역규모의 분석에서 전지구기후모델(GCMs)의 원자료를 그대로 사용할 경우 결과가 왜곡되는 현상이 발생한다. 따라서 정확한 분석을 위해 상세화된 지역 단위 해상도의 시나리오가 필요하다. 본 연구에서는 APCC에서 제공하는 국내 60개 종관기상관측장비(Automated Surface Observing System) 관측소 지점에 대해 통계적 상세화 기법인 Spatial Disaggregation Quantile Delta Mapping 방법을 사용하여 지역 기반 해상도로 다운스케일된 GCM 모의 결과를 활용하여 미래 가뭄전망을 실시하였다. 또한, 「기후변화 대비 수자원 적응기술 개발 연구단」에서 이러한 GCM 자료의 재현성 및 미래 기간에 대한 불확실성을 평가하였고, 기상청의 기후 변화 시나리오 인 증제도를 통과한 13개의 대표 시나리오를 선정하였다. 선정된 대표 시나리오는 Table 1과 같다.

Table 1의 지점단위 기후변화 시나리오는 티센망을 통해 중권역별 최고 및 최저기온, 강수량, 잠재증발산량을 산정하고, 강우유출모형 중 하나인 Precipitation Runoff Modeling-modular System에 적용하여 생성된 수문시나리오 자료이다. APCC로부터 확보한 중권역 단위의 기후변화 시나리오를 용수공급 및 수요현황과 관련된 지구단위로 변환하기 위하여 면적비를 적용하였다. 면적비는 각 지구가 어느 중권역에 포함되는지를 확인하여 중권역별로 구분되는 지구의 면적을 구하고, 지구를 모두 포함하는 총 중권역 면적으로 나누어 산정하였다(Kim et al., 2008). 이를 중권역 단위의 수문자료인 강수량 및 유출량에 곱하여 지구별 수문자료를 생성하였다. 즉, 본 연구에서는 RCP 4.5 및 8.5에 대하여 Table 1에 제시된 각 13개의 시나리오를 사용하였으며, 그 중 중권역 단위의 강수량 및 유출량을 지구단위로 변환하여 사용하였다.

대상자료의 분석기간은 1974년부터 2099년까지 약 120년으로서 하나의 기간으로 분석할 경우 과거에 비해 미래

의 기후추세가 왜곡될 수 있다. 따라서, 과거에 대한 미래의 경향을 기간별로 분석하기 위해 총 4개의 기간으로 분리하였다. 현재 2020년에 대해 과거기간을 기준기간 S0(1974~2019)라 하며, 미래기간은 기존 사례와 비교가 용이하도록 전기 S1(2020~2040), 중기 S2(2041~2070) 및 후기 S3(2071~2099)로 구분하였다.

3. 가뭄지수를 활용한 가뭄전망

3.1 표준강수지수

기상학적 가뭄은 일정기간 평균 강수량보다 적은 강수량으로 인해 건조한 날이 지속되는 것을 의미하며, 정상상태와 비교하여 건조 정도 및 건조 상태의 지속기간을 기초로 정의된다. 기상학적 가뭄을 정의하기 위해 일반적으로 표준강수지수(SPI)와 표준강수증발산량지수(SPEI) 등이 이용된다. 이중 SPI는 강수량만을 활용하기 때문에 계산이 간편하고 지역적 강수특성을 반영한다는 장점으로 인해(Kwon et al., 2015), 세계기상기구(World Meteorological Organization)는 기상학적 가뭄 감시를 위한 대표 가뭄지수로 권고하고 있다(Yoo et al., 2020). SPI는 시간단위별 누가강수시계열을 구성하여 가뭄에 미치는 영향을 산정할 수 있다(Ryu et al., 2002). 이동누가에 의한 방법으로 월 강수량을

Table 2. Drought Classification by SPI

Range of SPI	Moisture Condition
More than 2.00	Extremely Wet
1.50 ~ 1.99	Very Wet
1.00 ~ 1.49	Moderate Wet
-0.99 ~ 0.99	Near Normal
-1.49 ~ -1.00	Moderate Dry
-1.99 ~ -1.50	Severely Dry
Less than -2.00	Extremely Dry

Table 1. Information of climate change scenarios used in this study

No	GCMs	Resolution (degree)	Institution
1	CanESM2	2,813 x 2,791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
2	CESM1-BGC	1,250 x 0,942	National Center for Atmospheric Research
3	CMCC-CM	0,750 x 0,748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
4	CMCC-CMS	1,875 x 1,865	
5	CNRM-CM5	1,406 x 1,401	Centre National de Recherches Meteorologiques
6	GFDL-ESM2G	2,500 x 2,023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
7	HadGEM2-AO	1,875 x 1,250	Met Office Hadley Centre
8	HadGEM2-ES	1,875 x 1,250	
9	INM-CM4	2,000 x 1,500	Institute for Numerical Mathematics
10	IPSL-CM5A-LR	3,750 x 1,895	Institut Pierre-Simon Laplace
11	IPSL-CM5A-MR	2,500 x 1,268	Institut Pierre-Simon Laplace
12	MRI-CGCM3	1,125 x 1,122	Meteorological Research Institute
13	NorESM1-M	2,500 x 1,895	Norwegian Climate Centre

시간단위에 따라 연속적으로 중첩하여 구할 수 있다. 즉, 각 월을 기준으로 하여 시간단위에 해당하는 누가강수 시계열을 작성하고, 이를 누가된 월수로 나누어 대상 월에 따른 이동 평균 강수 시계열을 획득한다. 지속시간별 시계열이 구성되면, 이 시계열을 월별로 분석하여 적정 확률분포형을 산정하고 이를 이용하여 각각 누가확률을 산정한 후, 표준정규분포에 적용시켜 SPI를 산정한다. 일반적으로 단기 또는 계절가뭄을 모니터링하기 위해 3개월 시간 단위를 사용하고 있으며(Park et al., 2014), SPI의 가뭄등급별 분류 기준은 Table 2와 같다.

3.2 하천수가뭄지수

장기간의 수분 부족에 의해 전반적인 수자원 공급의 부족을 수문학적 가뭄이라 한다. 특히 댐이나 저수지, 하천 등의 수량 부족을 의미한다. 수문학적 가뭄을 모니터링 하는 대표적인 가뭄지수로 하천수가뭄지수(SDI)와 파머수문학적가뭄지수(Parlmer Hydrological Drought Index) 등이 있다. 가뭄의 심도, 지속기간, 빈도 및 공간분포 사이의 관계를 가뭄심도와 빈도의 관계로 단순화하는 개념을 통해 Nalbantis and Tsakiris (2009)는 SDI를 제안하였으며, 월 하천유량으로 수문학적 가뭄의 특성(심도 및 지속기간)을 산정할 수 있다. SDI는 Eq. 1~4와 같이 계산되며, 월 유량 $Q_{i,j}$ 와 누적값 $V_{i,j}$ 를 활용하여 Eq. 3에 의해 계산된다.

$$V_{i,j} = \sum_{j=1}^k Q_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, \dots, 12) \quad (1)$$

여기서, $V_{i,k}$ 는 i 번째 연도에서 k 기간 동안 누적한 유량 값이며, 이를 이용하여 특정 i 번째 연도의 k 기간에 대한 SDI를 산정할 수 있다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad (i = 1, 2, \dots, k = 12) \quad (2)$$

여기서, \bar{V}_k 와 s_k 는 각각 하천수량의 누가 평균과 누가 표준편차를 나타내며, 임계수준은 주로 평균 \bar{V}_k 가 사용된다.

작은 규모의 하천에서는 유량 값이 Gamma 분포형에 근사하게 되어 확률분포형이 왜곡될 수 있으므로 유량을 정규분포에 적합하도록 변환해야 한다(Yeh et al., 2015; Kim and Chung, 2018). Eq. 2에 의해 산정된 SDI를 2변수 대수정규분포형으로 변환하면, 최종 SDI를 Eq. 3과 같이 얻을 수 있다. Eq. 3~4의 y 는 유량에 자연로그를 취한 값이다.

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}} \quad (i = 1, 2, \dots, k = 12) \quad (3)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad (i = 1, 2, \dots, k = 12) \quad (4)$$

Table 3. Drought Classification by SDI

Range of SDI	Moisture Condition
More than 0.00	Normal
-0.99 ~ 0.00	Normal Dry
-1.49 ~ -1.00	Moderate Dry
-1.99 ~ -1.50	Severely Dry
Less than -2.00	Extremely Dry

Nalbantis and Tsakiris (2009)에 의하여 SDI의 심도를 분류하는 기준은 Table 3과 같다.

3.3 가뭄 모니터링 및 전망 결과

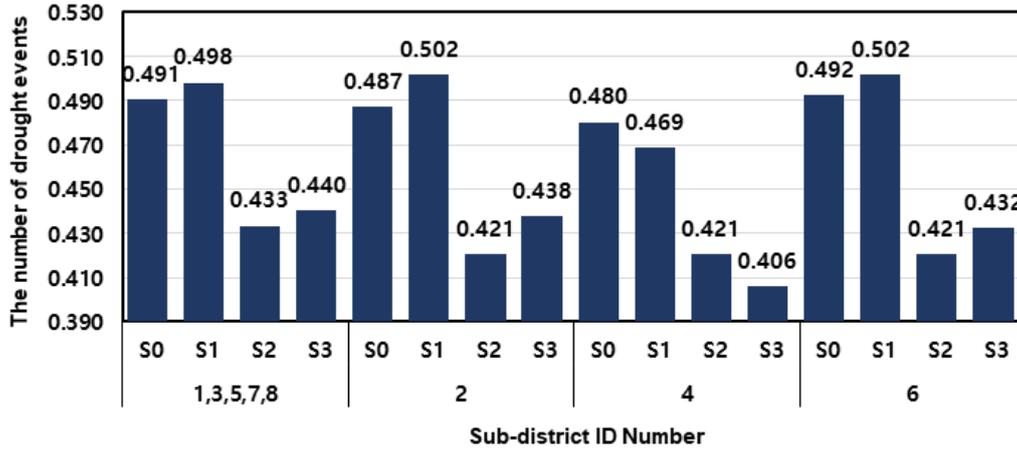
기간별 기상학적 및 수문학적 가뭄을 모니터링 및 전망하기 위하여 SPI와 SDI를 활용하여 가뭄특성을 산정하였다. 본 연구에서는 연구기간 대비 가뭄사상 개수, 지속기간 및 심도를 살펴보았으며, 각 지구마다 기간에 따라 변화하는 특성을 비교하였다. 먼저, Fig. 2는 SPI를 통해 기상학적 가뭄을 분석한 결과이다. 연평균 가뭄사상 개수는 약 0.4~0.5회 발생하였으며, 4번 지구를 제외하고 RCP 4.5에서는 S1기간에서, RCP 8.5에서는 S0기간에서 가장 많이 발생하였다. RCP 4.5의 경우 대부분 S1기간에서 약간 증가했다가 S2기간에서 크게 줄어든 후 S3기간에서 다시 약간 증가하는 경향을 보였지만, 4번 지구에서는 기간에 따라 계속 감소하는 경향을 보였다. RCP 8.5의 경우 4번과 6번 지구에서 S1기간 동안 발생횟수가 줄어든다 이후 계속 증가하는 경향을 보였으며, 나머지 구역에서는 S2기간까지 감소하다가 S3에서 약간 증가하는 경향이 나타났다. 가뭄 지속기간은 약 3개월 정도로, RCP 4.5의 경우 4번 지구만 S1기간에서 제일 크게 나타났으며, 다른 지구에서는 기간에 따라 계속 감소하는 것으로 산정되었다. RCP 8.5의 경우 모든 구역에서 S0기간이 제일 크고, S1기간에서 크게 감소하였다가 점차 증가하는 경향이 나타났다. 마지막으로 가뭄 심도는 RCP 4.5의 경우 S2기간까지 감소하다가 S3기간에서 증가하였으며, RCP 8.5에서는 S1기간에 크게 감소하였다가 이후로 계속 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 SDI를 통해 수문학적 가뭄을 분석한 결과이며, 모든 기간에서 연평균 약 0.4~0.6회의 가뭄사상이 발생하였다. RCP 4.5의 경우 4번 지구에서는 S2기간까지 증가하다가 S3기간에서 약간 감소하는 것으로 나타났으며, 다른 지구에서는 S1기간에서 가장 크게 나타났다가 이후 계속 감소하는 것으로 나타났다. RCP 8.5의 경우 4번 지구는 S2기간에서 한 해에 가장 많은 가뭄이 발생하며, 다른 지구에서는 기간에 따라 계속 증가하여 S3기간에서 가장 많은 가뭄이 발생할 것으로 전망된다. 가뭄 지속기간은 RCP 4.5의 경우 2, 4 및 6번 지구에서 S1기간이 제일 크게 나타났으며, 다른 지구에서는 S0기간에서 가장 크게 나타났다. RCP 8.5의 경우 S2기간까지 점차 감소하다가 S3기간에서 가장 크게 산정되었다. 가뭄 심도는 RCP 4.5의 경우 4번

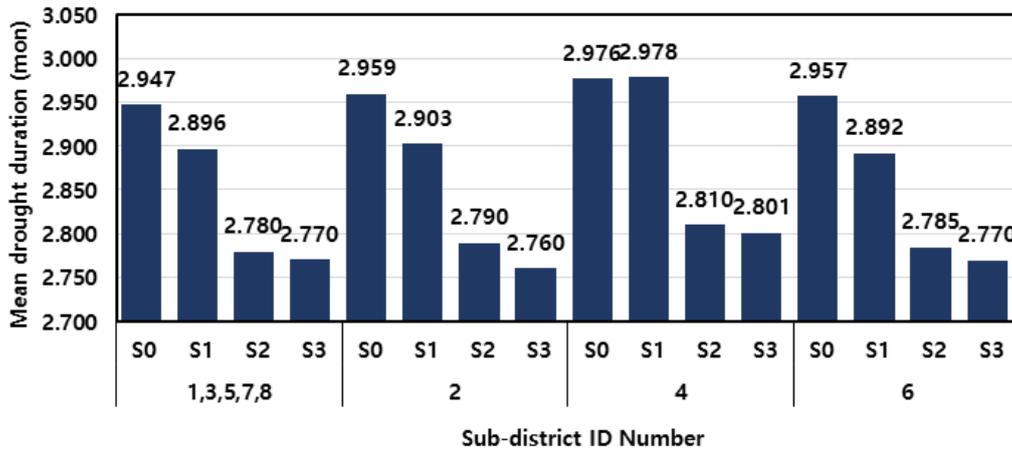
및 6번 지구에서 S1기간에서 가장 크게 나타났으며, 다른 지구에서는 S2기간에서 가장 크게 나타났다. RCP 8.5의 경우 모든 지구에서 S3기간에 가장 큰 평균 심도가 발생할 것으로 예상된다.

이러한 결과를 통해, 기상학적 및 수문학적 가뭄 특성이

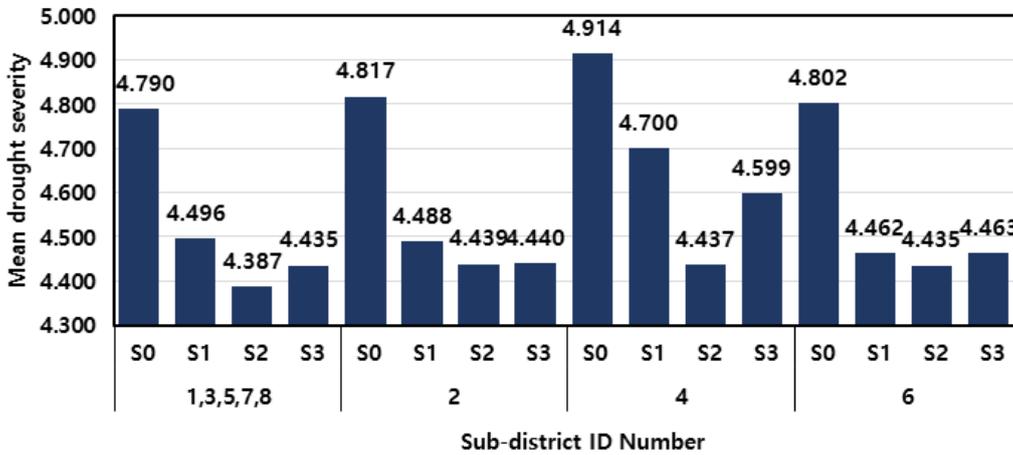
다른 것을 확인할 수 있다. 기상학적 가뭄은 대부분 과거에 심한 가뭄이 자주 발생한 것으로 나타났으나, RCP 8.5의 경우 S1기간부터 점차 가뭄 지속기간 및 심도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 수문학적 가뭄은 RCP 4.5의 경우 미래 S1기간에 가뭄이 빈번하게 발생할 것으로 예상되며, 4



(a) The number of drought events per year by RCP 4.5

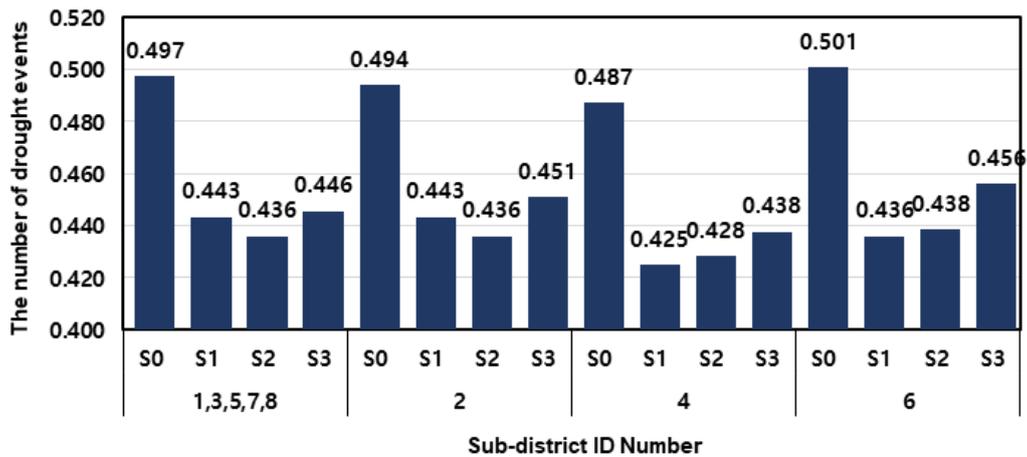


(b) Mean drought duration by RCP 4.5

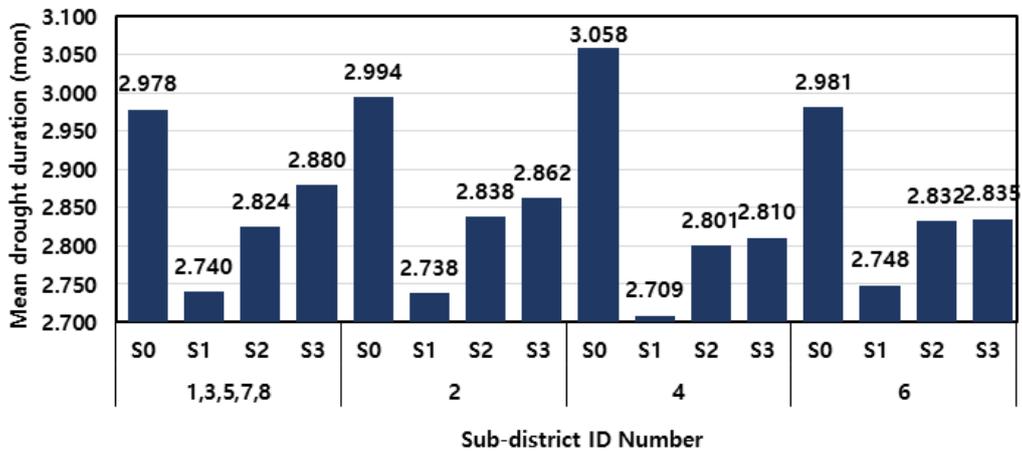


(c) Mean drought severity (unit : accumulated SPI) by RCP 4.5

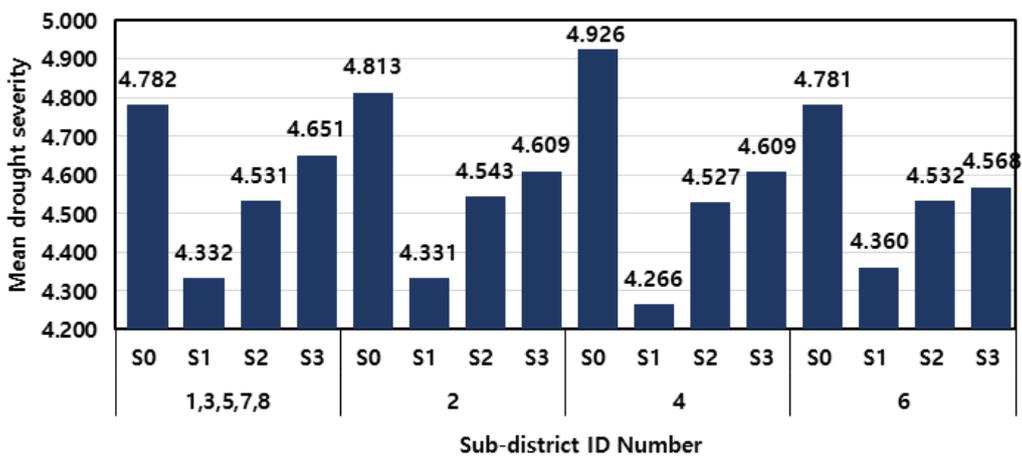
Fig. 2. Meteorological drought characteristics for SPI



(d) The number of drought events per year by RCP 8,5



(e) Mean drought duration by RCP 8,5



(f) Mean drought severity (unit : accumulated SPI) by RCP 8,5

Fig. 2. Meteorological drought characteristics for SPI (continue)

번 및 6번 지구에서는 미래 S1기간에서, 다른 지구에서는 S2기간에서 심한 가뭄이 발생할 것으로 전망된다. RCP 8.5의 경우 S3기간에서 지속기간이 길고 극심한 가뭄이 자주 발생하는 것으로 나타났다. Kim et al.(2015)에서 기후변화 시나리오에 따른 수문학적 가뭄 특성을 살펴본 결과 김천시 지역은 RCP 4.5에서는 S0기간 다음으로 S2기

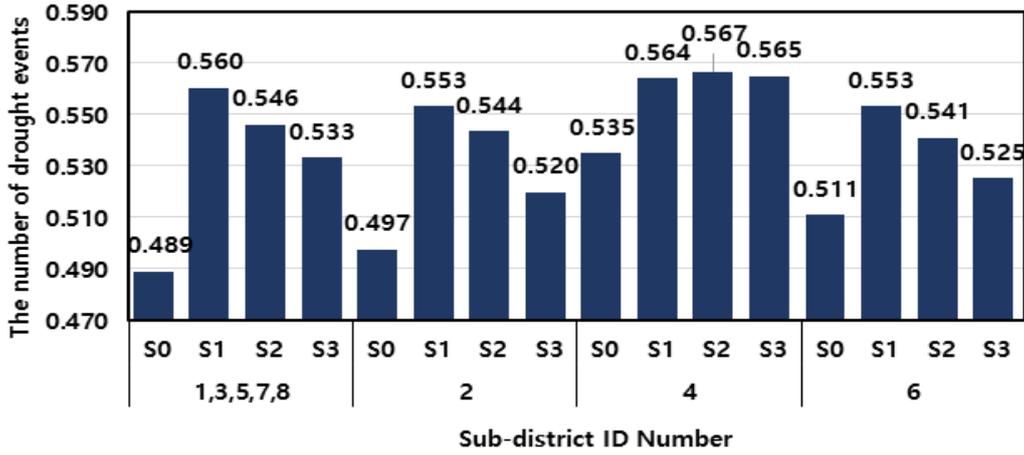
간에서 높게 나왔으며, RCP 8.5에서는 S0기간 다음으로 S3기간에서 높게 나왔다. 이를 통해 본 연구결과와 비슷한 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 전반적으로 2, 4 및 6번 지구는 다른 지구와 달리 2~3개의 중권역으로 이루어진 소구역으로서 다른 지구와 서로 다른 경향을 나타낸다.

4. 미래 갈수빈도해석

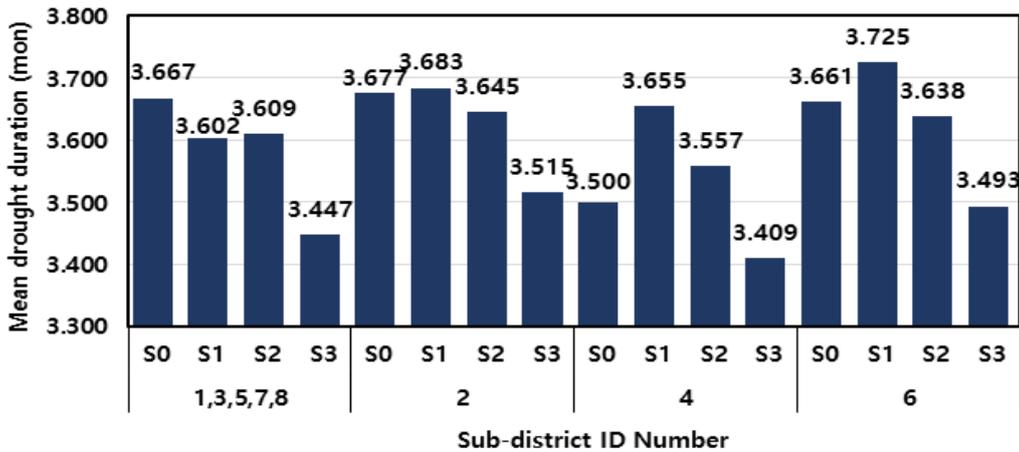
4.1 갈수빈도해석

현재 이수계획시 댐 및 저수지와 하천에 대한 갈수빈도는 각각 다른 변수를 대상으로 수행되고 있다. 댐 및 저수지 운영에서

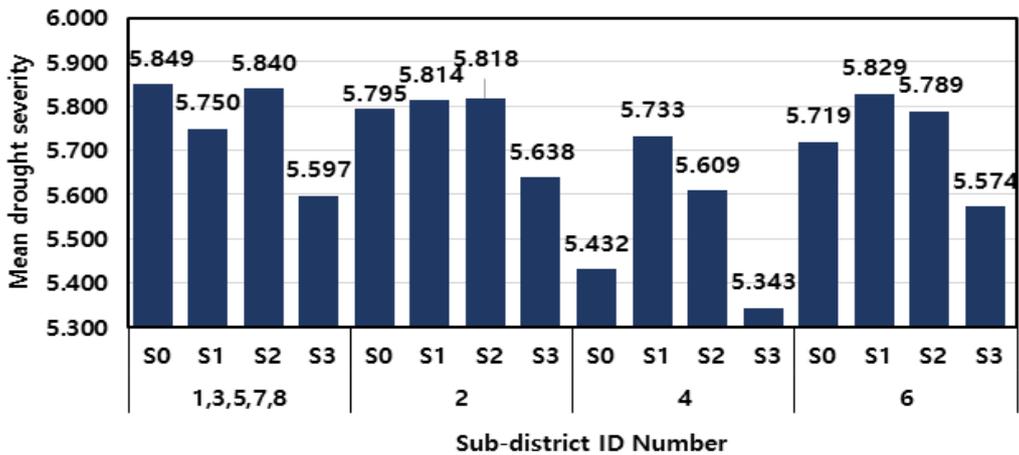
기준이 되는 지표는 수위이며, 수위와 가장 밀접한 관련이 있는 유출량(유입량)을 누적한 연간 유출량을 통해 댐 및 저수지 평가가 이루어진다(Jung et al., 2012). 연간 유출량에 대해 갈수빈도해석을 수행하여 재현기간에 따른 유출량을 얻을 수 있으며, 추정된 유출량을 배분하여 댐 및 저수



(a) The number of drought events per year by RCP 4.5

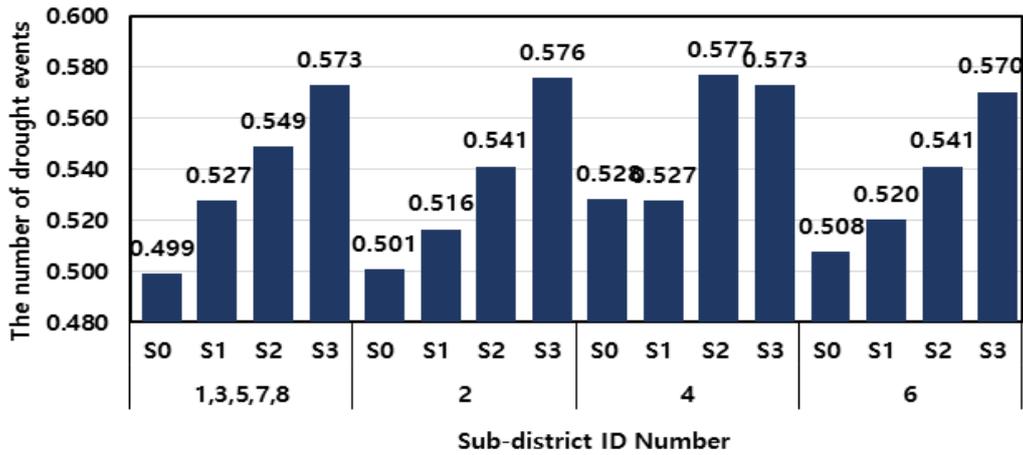


(b) Mean drought duration by RCP 4.5

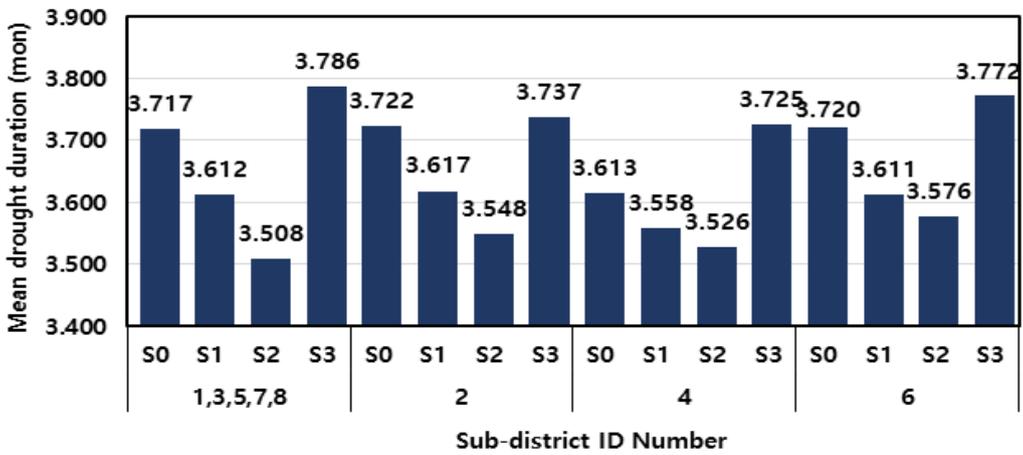


(c) Mean drought severity (unit : accumulated SDI) by RCP 4.5

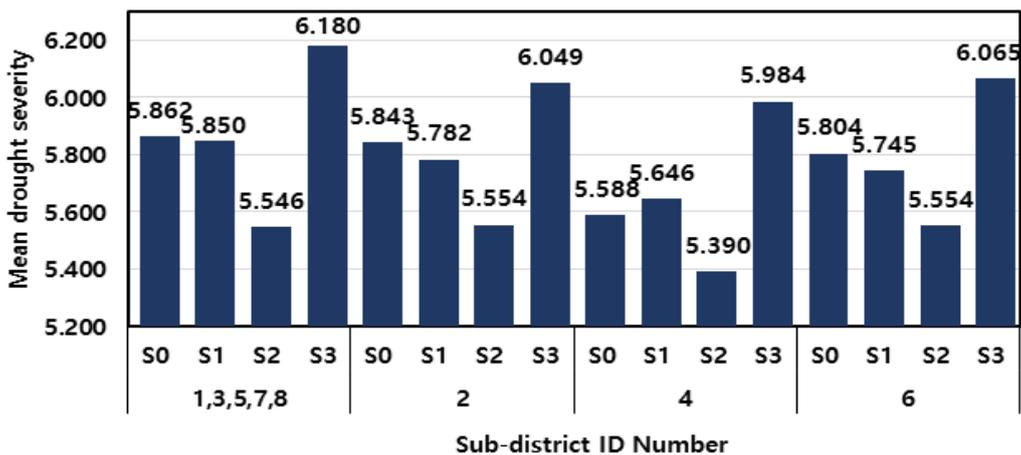
Fig. 3. Hydrological drought characteristics for SDI



(d) The number of drought events per year by RCP 8.5



(e) Mean drought duration by RCP 8.5



(f) Mean drought severity (unit : accumulated SDI) by RCP 8.5

Fig. 3. Hydrological drought characteristics for SDI (continue)

지 설계 및 운영에 반영할 수 있다. 이에 반해 하천유역에서 용수 공급 및 수요를 관리하는 기준으로 하천수 사용허가 기준유량을 사용하고 있으며, 하천수 사용허가 기준유량은 기준갈수량(10년 빈도 갈수량) 또는 기준갈수량에서 유지유량을 제외한 값으로 정의된다. 평수시와 홍수시의 유량을 기준유량으로 정의할 경우 특정기간에는 용수사용시 물

부족이 발생할 수 있기 때문에 갈수량을 기준으로 하고 있다(Park et al., 2016). 또한, 댐 및 저수지와 하천 모두 10년 빈도의 연간 유출량 또는 갈수량을 설계기준으로 사용하고 있다. 이는 10년 미만의 재현기간이 사용될 경우 소규모 시설물에서는 약한 가뭄에도 안정된 용수공급이 어려우며, 최근 기후변화로 인한 이상 기후현상에 대한 조치가 어

렵기 때문에 10년 빈도를 기준으로 제시하고 있다(Nam et al., 2018). 그렇기 때문에, 미래에 대한 유황, 갈수량 및 유출량의 변화를 살펴보아야 하며, 미래자료를 활용한 갈수빈도해석을 통해 기후변화에 탄력적으로 대응할 수 있는 댐 및 저수지와 하천 유량에 대한 기준제시가 필요하다.

김천시의 경우 김천시 가뭄대책종합마스터플랜에서 저수지 및 하천 등 수리시설물의 안정적인 가뭄 대응을 위하여 유황 및 기준갈수량을 기반으로 용수공급능력을 평가하고 있기 때문에 현재 및 미래에 대한 갈수빈도해석은 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 연간 유출량과 갈수량을 사용하여 갈수빈도해석을 수행하였으며, 10년 빈도에 해당하는 유출량 및 갈수량을 산정하여 댐 및 저수지 운영 및 하천수 사용에 관한 기준에 대한 기초자료를 제시하였다.

갈수빈도해석을 수행하기 위하여 먼저 입력자료의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 연간 유출량과 갈수량을 사용하였다. 연간 유출량은 일단위 유출량을 1년 동안 누적하여 연단위 시계열 자료로 변환하여 얻을 수 으며, 갈수량의 경우는 유황곡선(flow duration curve)을 활용하여 산정하였다. 유황곡선을 통해 시간에 따른 유출량의 특성을 확인할 수 있으며, 1년 동안의 일 유출량을 큰 것부터 순차적으로 배열하여 작성한다. 즉, 가로축은 시간적 순서와 관계없이 365일을 취하며, 세로축은 일 유출량이 된다. 일반적으로 유황은 95일 유출량인 풍수량, 182.5일 유출량인 평수량, 275일 유출량인 저수량 및 355일 유출량인 갈수량으로 구분된다. 가뭄에 대한 빈도해석은 저유량을 의미하는 갈수량

을 기준으로 수행된다. 유출량에 대한 계열 작성을 완료한 후 적절한 확률분포형 산정이 필요하다. 다양한 확률분포에 대한 매개변수를 추정하고 적합도 검정을 통해 최적 확률분포를 산정한 뒤 재현기간별 빈도해석을 실시한다.

본 연구에서는 총 9개의 확률분포(Exponential, Gaussian, Gamma, Log-normal, Poisson, Weibull, Generalized Extreme Value, Generalized Pareto, Extreme Value)에 대해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시하였다. 매개변수 추정방법은 30년 이상의 유출량 자료를 가지고 있기 때문에 표본자료의 크기가 충분할 때 매우 효과적인 최우도법을 적용하였다. 최적 확률분포를 결정한 후 확률분포형의 역함수에 비초과확률을 계산하여 재현기간별 연간 총 유출량 및 갈수량을 산정하였다.

4.2 갈수빈도해석을 통한 기준갈수량 산정

자료 크기에 따른 10년 빈도 유출량 및 갈수량의 변화를 살펴보기 위하여 1976년부터 대표년도까지 누적된 자료와 대표년도를 포함한 최근 30년 자료 각각에 대해 빈도해석을 실시하였다. 대표년도는 과거가 끝나는 시점(2019년)과 가까운 미래에 해당하는 미래 전기(S0)의 5년 단위 시점을 적용하였다. 빈도해석을 실시한 결과는 Table 4~7과 같으며, 이 결과는 각 시나리오별 10년 빈도 갈수량 및 유출량의 값을 평균한 것이다.

1976년부터 대표년도까지 누적된 자료를 사용한 기준갈수량 빈도해석과 최근 30년에 대한 갈수빈도해석 결과를 살펴

Table 4. Low-flow frequency analysis from 1976 to the representative year (unit: 10⁻³cms)

Year	2019		2020		2025		2030		2035		2040	
	RCP 4.5	RCP 8.5										
1	90.4	90.2	90.0	89.9	89.1	89.4	88.0	89.0	87.1	89.0	88.2	88.4
2	143.4	142.3	142.8	142.5	143.4	141.6	138.8	140.4	138.1	138.8	141.0	141.5
3	161.0	160.8	160.3	160.1	158.8	159.3	156.7	158.6	155.2	158.6	157.1	157.5
4	149.9	151.1	149.6	150.9	148.4	150.1	146.8	150.6	146.8	150.1	149.8	150.2
5	340.0	339.5	338.4	338.1	335.3	336.5	331.0	335.0	327.7	335.0	331.6	332.5
6	127.5	126.4	126.9	126.2	127.4	124.8	123.9	124.9	124.4	123.9	126.1	123.7
7	430.7	430.1	428.7	428.3	424.8	426.2	419.3	424.4	415.1	424.4	420.1	421.3
8	236.6	236.2	235.5	235.2	233.3	234.1	230.3	233.1	228.0	233.1	230.8	231.4

Table 5. Low-flow frequency analysis using data for 30 years (unit: 10⁻³cms)

Year	2019		2020		2025		2030		2035		2040	
	RCP 4.5	RCP 8.5										
1	85.8	86.2	85.1	86.8	84.8	86.5	83.9	86.4	81.2	82.3	81.4	83.7
2	135.4	138.1	136.1	137.0	135.7	136.7	132.6	137.3	127.3	130.5	128.1	131.6
3	152.9	153.6	151.6	154.6	151.1	154.2	149.4	153.9	144.8	146.7	145.0	149.1
4	144.5	147.9	144.5	146.3	142.5	147.6	144.9	151.6	141.0	147.1	145.7	146.9
5	322.9	324.3	320.1	326.4	319.1	325.5	315.5	324.9	305.7	309.7	306.2	314.9
6	120.6	122.9	119.8	121.1	119.7	121.6	117.9	123.1	114.7	116.3	114.3	117.1
7	409.1	410.9	405.5	413.5	404.3	412.4	399.7	411.6	387.2	392.3	387.9	398.9
8	224.7	225.7	222.7	227.1	222.1	226.5	219.5	226.1	212.7	215.5	213.1	219.1

Table 6. Annual total discharge frequency analysis from 1976 to the representative year (unit: cms)

District	Year	2019		2020		2025		2030		2035		2040	
		RCP 4.5	RCP 8.5										
1		606.7	601.6	601.6	602.8	600.8	600.8	601.8	605.9	601.0	606.2	609.6	609.6
2		955.1	953.8	950.5	952.7	948.6	952.4	951.3	955.6	952.6	957.9	962.6	963.4
3		1,080.9	1,071.9	1,071.8	1,074.0	1,070.4	1,070.4	1,072.2	1,079.5	1,070.8	1,080.0	1,086.1	1,086.1
4		994.6	1,000.3	991.9	998.5	991.9	1,003.1	994.2	1,006.7	992.4	1,006.5	1,006.6	1,009.2
5		2,282.5	2,263.6	2,263.4	2,267.9	2,260.5	2,260.4	2,264.3	2,279.6	2,261.3	2,280.6	2,293.6	2,293.5
6		852.3	851.8	848.4	849.8	844.2	848.8	847.9	851.5	846.3	854.7	857.9	857.4
7		2,891.6	2,867.6	2,867.3	2,873.1	2,863.6	2,863.5	2,868.4	2,887.9	2,864.7	2,889.1	2,905.6	2,905.4
8		1,588.2	1,575.0	1,574.8	1,578.0	1,572.8	1,572.8	1,575.5	1,586.2	1,573.4	1,586.8	1,595.9	1,595.8

Table 7. Annual total discharge frequency analysis using data for 30 years (unit: cms)

District	Year	2019		2020		2025		2030		2035		2040	
		RCP 4.5	RCP 8.5										
1		598.2	599.0	593.9	599.8	584.7	604.6	596.8	605.2	612.3	615.4	613.4	620.8
2		940.5	944.0	938.7	951.7	926.0	952.6	938.8	951.5	967.3	969.2	969.8	978.9
3		1,065.8	1,067.2	1,058.1	1,068.6	1,041.8	1,077.2	1,063.3	1,078.2	1,090.8	1,096.5	1,092.9	1,106.0
4		982.6	987.1	980.4	985.5	966.0	997.3	986.2	1,006.2	1,007.0	1,020.8	1,015.3	1,034.5
5		2,250.7	2,253.5	2,234.4	2,256.5	2,200.0	2,274.8	2,245.5	2,276.9	2,303.5	2,315.5	2,307.9	2,335.7
6		837.8	841.1	834.6	848.1	827.3	849.6	836.6	847.7	856.6	864.5	865.6	878.0
7		2,851.3	2,854.8	2,830.6	2,858.6	2,787.0	2,881.7	2,844.6	2,884.5	2,918.2	2,933.4	2,923.7	2,958.9
8		1,566.1	135,341.1	1,554.7	135,654.9	1,530.7	136,751.5	1,562.4	136,880.0	1,602.8	139,202.4	1,605.8	140,412.6

보면 RCP 4.5의 경우 대부분의 지구에서 기준갈수량은 계속 작아지다가 2040년에 약간 증가하였다. RCP 8.5의 경우 대부분의 지구에서 시간이 지남에 따라 계속 감소하나, 2, 4 및 6번 지구에서 약간 증가하는 기간이 있는 것을 확인할 수 있으며, 2번 지구를 제외하고 모든 지구에서 미래에는 2019년 보다 작은 기준갈수량이 산정되었다. 최근 30년에 대한 갈수빈도해석 결과 RCP 4.5의 경우 2번 및 4번 지구를 제외하고 모든 지구에서 계속 감소하다 2040년에 약간 증가하는 경향을 보였으나, RCP 8.5에서는 2020년에 증가하였다가 2035년에 크게 감소하는 것으로 전망되었다. 또한, 누적된 총 기간에 대한 갈수빈도보다 최근 30년에 대한 갈수빈도해석에서의 기준갈수량이 더 작게 산정된 것은 기간이 점차 지나면서 기준갈수량은 작아지는 추세라는 것을 보여준다.

1976년부터 대표년도까지 누적된 자료를 사용한 연 유출량 빈도해석 결과 RCP 4.5에서는 2025년까지 점차 감소하다가 2030년부터 다시 증가하는 경향을 보였으며, RCP 8.5에서는 2020년도에 잠깐 증가했다가 2030년도부터 다시 증가하는 것으로 전망되었다. 최근 30년 자료를 활용하여 분석한 결과에서는 RCP 4.5의 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, RCP 8.5의 경우 2020년부터 꾸준히 증가한다는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 기간이 지날수록 유출량은 증가하는 현상을 의미하며, 더욱이 10년 빈도 유출량은 증가하지만 10년 갈수량은 감소한다는 것은 미래에 전체적인 유출량은 증가하나 가뭄 발생시 그 크기가 현재보다 더욱 심각해진다는 것을 의미한다. 즉, 미래에는 극한

가뭄이 더욱 자주 발생할 것이며, 그 크기가 커질 것으로 전망된다. 이와 유사하게 Yoon et al.(2014)에서 광동댐 유역에 대해서 갈수빈도해석을 진행한 결과 또한 현재보다 미래에서 가뭄발생 강도 및 빈도가 증가할 것으로 전망하였으며, 특히 심한 가뭄의 발생확률이 커질 것으로 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 경상북도 김천시에 대해 RCP 4.5 및 RCP 8.5 각각 13개 시나리오씩 총 26개의 시나리오에 따른 가뭄 전망 및 갈수빈도해석을 수행하였다. 중권역 단위의 자료를 면적비를 이용하여 용수구역 및 급수체계가 고려된 8개의 지구단위로 변환하였다. 변환된 자료를 통해 산정된 SPI 및 SDI를 활용하여 기상학적 및 수문학적 가뭄을 S0, S1, S2 및 S3 기간에 대해 가뭄전망을 수행하여 기간별 패턴을 분석하였다. 그 결과 기상학적 가뭄의 경우 과거인 S0 기간에 가장 위험하였으나, RCP 8.5의 경우 S1에서 S3로 갈수록 가뭄 지속기간 및 심도가 커지는 것으로 전망되었다. 수문학적 가뭄은 미래에서는 RCP 4.5의 경우 4번 및 6번 지구에서는 S1기간에서, 다른 지구에서는 S2기간에서 심한 가뭄이 발생할 것으로 전망되었으며, RCP 8.5에서는 S3기간에서 극심한 장기가뭄이 발생할 것으로 나타났다. 특히, 2, 4번 및 6번 지구는 여러개의 중권역으로 이루어진 용수구역 기반의 소구역으로서 인접한 지구임에도 불구하고

고 다른 지구의 가뭄 특성과 차이를 보였다. 따라서 가뭄 대책 마련시 이러한 결과를 고려해야 한다.

기후변화 시나리오를 적용한 갈수량 빈도해석 및 유출량 빈도해석을 수행한 결과 연간 유출량의 기준유량은 점점 증가하지만 갈수량 빈도해석을 통한 기준갈수량은 점점 더 감소하는 것을 확인하였다. 이는 미래의 유출량은 증가하지만 가뭄이 일어났을 때 그 기준은 더 낮은 것으로, 가뭄 발생시 피해는 더욱 심각할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구를 통해 산정된 김천시의 기후변화 현황 자료와 더불어 지구별 기상학적 및 수문학적 가뭄지수 전망 결과와 갈수빈도해석 결과는 김천시 가뭄대책 및 정책 수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 마지막으로 단순 면적비 유량배분 기법이 아닌 소구역 단위로 모의된 유량 자료를 활용하여 갈수빈도해석을 진행한다면 더욱 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으나, 현재 소구역 단위의 유량 전망 자료를 산정하는데에 한계가 있다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1012919).

References

- Ahn, KH and Palmer, RNJHP (2016). Use of a nonstationary copula to predict future bivariate low flow frequency in the Connecticut river basin, *Hydrological Processes*, 30(19), pp. 3518–3532.
- Ahn, SR, Kwon, HJ, Park, JY and Kim SJ (2008). Preparation of the agricultural drought map of water district in Geum river basin, *Proceedings of the Korea Society of Civil Engineers Conference*, pp. 3576–3579.
- Bae, MS, Ha, SR and Park, JH (2007). Water Balance Analysis using Hydro-informatics. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 162–167.
- Caruso, BS (2000). Evaluation of low-flow frequency analysis methods, *J. of Hydrology*, 39(1), pp. 19–47.
- Gwak, YS, Cho, JP, Jung, IG, Kim, DW and Jang, SM (2018). Projection of future changes in drought characteristics in Korea peninsula using effective drought index, *J. Climate Change Research*, 9(1), pp. 31–45.
- Im, ES, Kwon, WT and Ahn JB (2005). Downscaling of winter river-basin precipitation using a neural network, *Asia-Pacific J. of Atmospheric Sciences*, 41(1), pp. 89–99.
- Jung, Y, Nam, WS, Shin, H, and Heo, JH (2012). A study on low-flow frequency analysis using dam inflow, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 32(6B), pp. 363–371.
- Kim, NS, Kim, JS, Jang, HW and Lee, JH (2015). Hydrologic risk analysis based on extreme drought over the Korean peninsula under climate change *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(4), pp. 45–52.
- Kim, SH and Chung, ES (2018). Analysis of peak drought severity time and period using meteorological and hydrological drought indices, *J. of Korea Water Resources Association*, 51(6), pp. 471–479.
- Kim, SJ, Ahn, SR, Shin, YH, Na, SJ and Kwon, HJ (2009). Development and application of hydrological drought assessment technique, *GRI Review*, 11(1), pp. 163–182.
- Kim, YK, Choi, GW, Ham, MS, and Kim, NW (2008). The analysis of potential discharge by dam in Han River basin at dry Season, *J. of Korea Water Resources Association*, 41(11), pp. 1143–1152.
- Kwon, HJ, Lim, HJ and Kim, SJ (2007). Drought assessment of agricultural district using modified SWSI, *J. of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10(1), pp. 22–34.
- Kwon, MS, Jun, KS, Hwang, MH and Kim, TW (2015). Assessment of meteorological drought using cumulative severity of daily standardized precipitation index, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(2), pp. 123–131.
- Lee, BR, Sung, JH and Chung, ES (2015). Comparison of meteorological drought and hydrological drought index, *J. of Korea Water Resources Association*, 48(1), pp. 69–78.
- Liu, L, Hong, Y, Looper, J, Riley, R, Yong, B, Zhang, Z, Hocker, J and Shafer, M (2013). Climatological drought analyses and projection using SPI and PDSI: case study of the Arkansas Red River Basin, *J. of Hydrologic Engineering*, 18(7), pp. 809–816.
- Nalbantis, I and Tsakiris, G (2009). Assessment of hydrological drought revisited, *Water Resources Management*, 23(5), pp. 881–897.
- Nam, WH, Kwon, HJ and Choi, KS (2018). Reevaluation of design frequency of drought and water supply safety for agricultural reservoirs under changing climate and farming methods in paddy field, *J. of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 60(1), pp. 121–131.
- Park, BS, Lee, JH, Kim, CJ and Jang, HW (2013). Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 33(5), pp. 1871–1885.
- Park, JC, Choi, KJ and Song, SH (2014). Prediction of regional drought considering aspect and elevation in Jeju Island under future climate Change, *J. of Environmental Science International*, 23(4), pp. 649–660.

- Park, JE, Kim, HN, Ryoo, KS and Lee, ER (2016). Evaluation of flexible criteria for river flow management with consideration of spatio-temporal flow variation, *J. of Korea Water Resources Association*, 49(8), pp. 673-683.
- Tirivarombo, S, Osupile, D, Eliasson, P (2018). Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106, pp. 1-10.
- Yeh, CF, Wang, J, Yeh, HF and Lee, CH (2015). SDI and Markov chains for regional drought characteristics, *Physics Chemistry of the Earth*, 7(8), pp. 10789-10808.
- Yoo, J, So, BJ, Kwon, HH and Kim, TW (2020). Development of drought map based on three-dimensional spatio-temporal analysis of drought, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 40(1), pp. 25-33.
- Yoon, SK, Cho, JP and Moon, YI (2014). Non-parametric low-flow frequency analysis using RCPs scenario data: a case study of the Gwangdong storage reservoir, Korea, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), pp. 1125-1138.